

# 가상환경을 위한 효율적인 힘반향 알고리즘의 개발

권혁조\*(전북대 대학원 정밀기계공학과), 김기호(한국 원자력연구소),  
오재윤(전북대 메카트로닉스 연구센터)

## Development of an Efficient Force Reflection Algorithm for a Virtual Environment

H. J. Kwon(CBNU, Dept. of Precision M.E.), K. H. Kim(KAERI), C. Y. Oh(CBNU, MRC)

### ABSTRACT

In this study, efficient force reflection algorithm is developed for the Haptic Display by using a proxy concept and friction model. When there are not any contacted obstacles the proxy is following human operator's command trajectory in the 3D virtual space. But when the operator's command trajectory is locating inside of the object, the proxy is constrained by the surface of the object. Here only with the information of the proxy position and operator's command trajectory at every time step, we can calculate the reflection force and its orientation. To display the friction force between two virtual stiff material which are sliding against each other, modified Karnopp's friction model is used. In the friction model, a damping term and a Stribeck effect term are included to display the relative velocity effect and stick-slip effect at the very low relative velocity region respectively.

**Key Words** · Haptic display(햅틱 디스플레이), Force reflection(힘반향), Telcooperation(원격조작), Proxy(탐촉구), Virtual environment(가상환경), Karnopp's friction model(카르노프 마찰 모델), Stribeck effect(스트라이벡 효과)

### 1. 서론

힘반향 정보를 이용하지 않고 시각정보에만 의존하는 일반적인 원격조작에 있어서의 문제점과 한계를 극복하기 위하여 현재 힘반향 정보를 시각정보와 더불어 이용하는 힘반향 원격조작시스템에 관한 연구가 많이 수행되고 있다. 힘반향 원격조작에 관한 연구에서는 주로 시스템 운용의 안정성을 향상시키기 위한 제어기법 개발, 가상환경과의 융합, 반향되는 힘 정보의 사실감 향상 등과 같은 분야를 많이 다루고 있다.

힘반향 원격조작시스템에 가상환경을 적용하는 경우는 주로 원격지의 작업환경 및 작업 자체에 관한 정보를 실시간으로 획득하기 어렵거나, 작업에 관한 정보를 조작자가 좀더 직관적으로 습득이 용이한 다른 형태의 정보로 가공하여 주고자 하는 경우<sup>[1]</sup>, 또는 조작자의 시스템 운용 교육 등을 그 목적으로 하는 경우가 많다. 이렇게 가상환경으로부터의 힘정보를 조작자에게 반향하여 주고자 하는 경우에

중요하게 고려하여야 할 문제로는 가상 환경내의 가상물체간의 충돌에 의하여 발생하게되는 반발력을 얼마나 실제 환경에서 발생하는 힘과 일치시킬 수 있는가 하는 점이다

본 연구는 가상환경내의 가상물체간의 충돌, 접촉에 기인한 물체간의 반발력을 실제환경의 반발력과 근사시킬 수 있는, 강성 물체 사이의 마찰 모델을 포함하는 햅틱 디스플레이 알고리즘의 개발을 그 목적으로 한다. 사용되는 마찰모델로서는 상호 접촉하여 미끄러지는 두 물체 사이의 점접효과와 저속운동에서의 스틱-슬립 현상을 사실적으로 표현하기 위해 스트라이벡 효과를 포함하는 수정된 카르노프 마찰모델(Karnopp's Friction Model)<sup>[2,3]</sup>을 제안한다

### 2. 가상환경의 탐촉구 개념

가상환경의 자유공간에서는 모든 운동이 가능하지만 가상 물체의 내부에 침입하지 못하고 표면에 구속되는 탐촉구(proxy)라는 가상의 임의의 물체의

위치만을 계산함으로써 마찰력, 점성력, 표면 질감 등을 표현할 수 있다. 자유공간 안에서의 탐촉구의 움직임은 조작자가 운전하는 주조작기의 취수부의 중심점과 일치하지만 가상물체와 탐촉구가 충돌하는 경우, 주조작기 취수부와 탐촉구의 위치는 일치하지 않게 된다. 이때 두 점간의 거리와 상대속도를 이용하여 반발력의 크기와 방향을 계산하게 된다.

반발력과 크기는 같지만 방향이 반대인 힘을 가상의 중력항(virtual gravity term)으로 가정하였을 때, 임의의 가상 질량을 갖는 탐촉구가 가상의 중력항에 대하여 위치에너지를 최소화 하는 지점(local minimum)으로 이동하려는 성질을 갖는다는 기본 개념을 적용하여 다음 단계의 탐촉구 위치를 계산하게 된다 여기서 마찰력 점성력, 표면 질감의 효과 등은 탐촉구와 가상 물체 사이의 상대 운동을 고려함으로써 계산된다. 본 연구에서는 실제 환경의 운동이 아닌 이런 가상 환경내의 운동을 "가상 중력장에서의 운동"이라고 정의하고 이 운동을 해석하여 계산된 새로운 탐촉구의 위치는 다음 단계에서 조작자에게 반향하여 주계되는 힘을 계산하는 데 이용된다.

여기서 탐촉구는 가상 질량(virtual mass)을 갖으며 이런 가상 질량은 오직 가상 중력항과 탐촉구와 접촉면 사이의 마찰력, 점성력, 표면 질감 등에 의해서만 운동의 변화를 일으키게 된다. 이런 가상 중력장에서의 운동법칙은 그 형태는 일반 주위 환경의 운동법칙과 동일하지만 그 결과가 직접 조작자에게 어떤 물리적인 방법으로 전달되지는 않는다. 가상 중력장에서의 운동을 고찰함으로써 단지 탐촉구의 다음 위치를 계산하게 되는 것뿐이다. 이런 새로운 탐촉구의 위치와 조작자의 작업 명령집 사이의 거리 및 방향을 계산함으로써 가상 환경 내에서 발생하는 힘의 크기와 힘의 방향을 알 수 있게 된다. 즉, 가상 중력장에서의 운동은 실제 동역학적인 관점에서의 운동과는 무관하고 단지 원하는 정보를 얻기 위한 중간단계의 수단에 불과하다.

이렇게 두 계층으로 힘반향 알고리즘을 분리함으로써 얻어지는 장점은 다음과 같다.

- 1) 복잡한 계산을 두 계층으로 분리함으로써 알고리즘을 단순화시킬 수 있다.
- 2) 탐촉구에 부여한 임의의 질량에 의한 동특성을 조작자에게서 분리한다. 탐촉구의 동특성은 오로지 탐촉구의 새로운 위치 계산에만 사용된다.
- 3) 새로운 마찰 모델이나 점성력 모델, 표면 질감의 표현 모델 등을 손쉽게 적용할 수 있다.
- 4) 실제 조작자에게 반향되는 힘 정보는 단순하게 탐촉구의 위치만을 참고로 결정된다.
- 5) 현재 일반적으로 이용되는 컴퓨터 그래픽스 관련 기법들과 호환성이 뛰어나다. 예를 들어 면의 법선 벡터에 관한 정보, 표면 음영처리 기법(Phong Shading 등)<sup>14)</sup> 등을 이용하여 반향 될 가상의 힘을

쉽게 생성할 수 있다.

탐촉구의 움직임과 관련이 있는 정보로는 탐촉구의 가상 질량, 가상 중력항, 가상 물체의 강성, 가상 물체의 댐핑 상수 등을 들 수 있다.

현재 컴퓨터 그래픽스에서는 곡면을 포함하는 모든 면들이 평면들의 조합으로 표현되기 때문에 본 연구에서 요구되는 가상 중력하에서 최소 위치 에너지를 갖는 지점을 구하는 과정이 진정한 의미의 연속적인 곡면에서 그 값을 찾는 경우에 비하여 다음과 같은 경우들로 단순화 될 수 있다.

- 1) 탐촉구가 하나의 면과 접촉하는 경우(Fig 1(a))
- 2) 탐촉구가 두 개 이상의 면과 접촉하는 경우(Fig 1(b))
- 3) 탐촉구가 두 개 이상의 물체 사이에 그림과 같이 걸치는 경우(Fig 1(c))

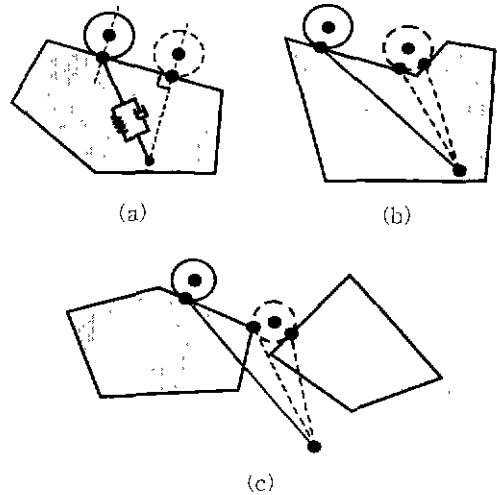


Fig. 1 Local minimums under a virtual gravity force  
 (a) Local minimum with 1 contact surface  
 (b) Local minimum with over 2 contact surfaces  
 (c) Local minimum with over 2 contact objects

### 3. 마찰모델

본 연구에서 이용되는 마찰모델은 충분히 작은 상대속도의 영역에서는 속도가 증가함에 따라 마찰력이 감소한다는 스트라이벡 효과(Strunbeck effect)를 포함하는 변형된 카르노프(Karnopp) 모델<sup>15)</sup>을 이용한다. 이 모델이 일반적인 카르노프 모델과 다른 점은 저속에서의 스틱-슬립 현상을 묘사하기 위하여 낮은 속도영역에서의 스트라이벡 효과를 포함한다는 점과 접촉 물체의 점성에 의한 마찰력 변화를 모델에 포함시킨다는 점이다. 다음 Fig. 2는 두 강성 가상 물체의 상대 속도와 관련된, 본 연구에서 제안하는 변형된 카르노프 마찰모델을 이용하여

구해지는 마찰력과의 관계를 나타내는 그림이다

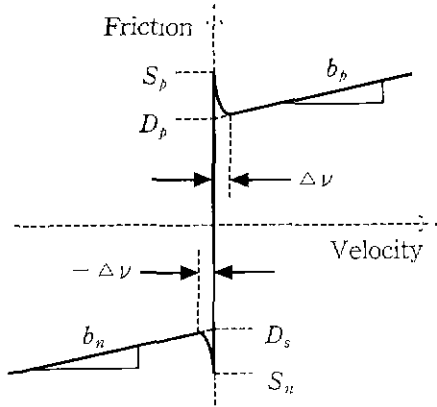


Fig. 2 Modified Karnopp's friction model which includes damping effect and Stribeck effect

$$F_{friction}(x, F_v) = \begin{cases} (D_n + b_n \dot{x})F_v & \dot{x} < -\Delta v \\ \left( \frac{(S_n - D_n)}{\Delta v^2} (v + \Delta v)^2 + D_n \right) F_v & -\Delta v < x < 0 \\ \left( \frac{(S_p - D_p)}{\Delta v^2} (v - \Delta v)^2 + D_p \right) F_v & 0 < x < \Delta v \\ (D_p + b_p \dot{x})F_v & x > \Delta v \end{cases}$$

여기서

- $D_p, D_n$  : 양음의 동마찰력 값
- $b_p, b_n$  : 양음의 댐핑마찰 계수
- $x$  : 두 마찰 표면의 상대 속도
- $S_p, S_n$  : 양음의 정마찰력 값
- $\Delta v$  : 속도가 0으로 간주될 수 있는 아주 작은 속도의 범위
- $F_v$  : 접촉면에 작용하는 수직하중

마찰력은 마찰계수 및 수직하중에 비례한다. 여기서 마찰계수에 의한 마찰력 크기 변화의 효과는 Fig. 2의 계수들에 포함되어 있으므로, 결국 본 연구에서 계산되는 마찰력의 크기는 결국 수직하중에 비례하고 두 접촉 물체 사이의 상대속도에 의존하게 된다. 여기서 마찰력에 직접적인 영향을 미치게 되는 수직하중의 크기는 다음 Fig. 3과 같은 반발력 계산 개념을 이용하여 구해진다.

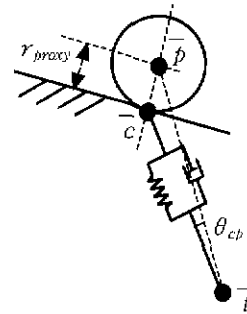


Fig. 3 The basic concepts of force generation with the information of the proxy center position  $\bar{p}$ , contact position  $\bar{c}$ , operator's command position  $\bar{t}$

Fig. 3과 같은 상황에서의 반발력의 절대 크기는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$|F| = dis \times K + vel_t \times D$$

또한 반발력의 방향  $dir(F)$ 는  $\bar{t}$  에서 시작하여  $\bar{c}$  를 지나는 선분 방향이 된다 따라서 접촉면에 수직인 수직력, 즉 마찰 모델에 사용될 수직하중의 크기와 방향을 알 수 있게된다.

#### 4. 탐촉구의 움직임

탐촉구에 여러 외력 성분이 작용하게 되는데 이때 탐촉구의 기동을 하기 위한 조건으로는  $F_t > F_n \cdot \mu_s (= F_{friction})$  이어야 한다는 점이다. 이 조건을 만족하는 경우, 탐촉구는  $F_t$  방향으로 움직이기 시작해서 가상 중력장의 위치 에너지를 최소로 하는 지점으로 이동하게된다 (Fig. 4)

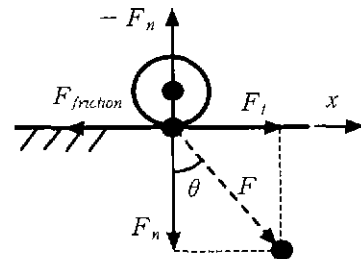


Fig. 4 Force generation by virtual proxy and operator's command trajectory

$$F_{friction} = F_n \cdot \mu_s$$

$$F_t = F \cdot \sin(\theta) = (K \cdot (\bar{t} - \bar{c}) + vel_t \cdot D) \cdot \sin(\theta)$$

$$F_n = F \cdot \cos(\theta) = (K \cdot (\bar{t} - \bar{c}) + vel_t \cdot D) \cdot \cos(\theta)$$

및 식은 탐촉구와 접촉면 사이의 동마찰, 댐핑 등을 고려하지 않은 상황으로, 이 경우 탐촉구의 움직임 속도에 제한이 없으므로 곧바로 다음 스텝에서 탐촉구는 가상 중력장에서의 최소 위치에너지를 갖는 지점에 위치하게 된다. 그러나, 탐촉구와 접촉면 사이의 동마찰, 댐핑 등을 고려한 실제적인 경우에 있어서는 탐촉구의 속도에 제한이 있어 무제한의 속도로 탐촉구가 곧바로 가상 중력장하의 최소 위치에너지를 갖는 지점으로 이동할 수 없게 된다. 이 경우는 다음과 같은 탐촉구 이동 속도의 제한을 고려하여, 다음 스텝의 탐촉구 위치를 계산해야 한다. 이런 속도의 제한에 의해 탐촉구의 위치가 제한되고, 이는 탐촉구 접촉점과 조작자 작업 명령점 사이의 거리에 영향을 미친다. 즉 마찰력이 반발력에 포함된다고 말할 수 있다

탐촉구의 운동에 영향을 미치는 외력들인 현재의 반발력  $F$ , 마찰력  $F_{friction}$ , 수직 반발력  $-F_n$  등을 고려하여 탐촉구의 운동방정식을 세워보면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} = F - F_n + \mu_d \cdot F_n$$

여기서 탐촉구의 질량  $m$ 을 무시하면, 탐촉구의 속도  $\dot{x}$ 는 다음과 같다.

$$x = \frac{F - F_n + \mu_d \cdot F_n}{b}$$

탐촉구의 운동방향은  $F$ , 방향이고 탐촉구의 다음 단계의 새로운 위치  $\overline{p}_{new}$ 는 다음과 같이 간단히 구할 수 있다.

$$\overline{p}_{new} = \int (vel_{prox}) dt + \overline{p}$$

## 5. 결론

본 연구에서는 현재 많이 사용되고 있는 일반적인 컴퓨터 그래픽스 기법으로 제작된 가상환경의 정보를 이용하여 효율적으로 햅틱 디스플레이를 할 수 있는 힘반향 알고리즘을 제시하였다. 탐촉구 개념을 적용하여 조작자의 작업 명령 궤적과 탐촉구의 위치가 불일치 하는 경우, 두 지점 사이의 거리를 고려함으로써 효과적으로 반발력의 크기와 방향을 계산할 수 있고 이런 반발력을 가상의 중력항으로 보고 탐촉구의 다음 위치를 계산하는 알고리즘을 설명하였다 또한 물체 사이의 마찰력을 표현하기 위한 마찰 모델로 점성효과와 두 접촉 물체의 상대속도가 충분히 작은 경우 상대속도가 증가하더라도 마찰력이 감소한다는 스트라이백 효과를 포함하는 변형된 카르

노프 마찰모델을 제시하였다 이 마찰 모델을 이용하여 탐촉구와 물체 사이의 마찰력을 계산할 수 있다. 이 마찰력은 반발력과 함께 탐촉구의 운동에 영향을 미친다.

## 참고문헌

- 1) Hyokjo KWON, Sangduk JUNG, Chaeyoun OH, Kiho KIM, Jangjin PARK, "Development of a Force Reflection Master Manipulator and Graphic Simulator," Proceedings of the IASTED International Conference, Intelligent Systems and Control 2000, pp. 29-34, Aug. 2000.
- 2) Diego C Ruspini, Krasimir Kolarov and Oussama Khatib, "The Haptic Display of Complex Graphical Environments," Proc SIGGRAPH 97, pp. 345-352, Aug. 1997
- 3) Diego C. Ruspini, Krasimir Kolarov and Oussama Khatib, "Haptic Interaction in Virtual Environments," Proc Int Conf. Intelligent Robots and Systems, Grenoble France, pp. 128-133, Sep 1997
- 4) Edward Angel, "Interactive Computer Graphics a top-down approach with OpenGL, 2nd Ed.," Addison Wesley, 2000.
- 5) Christopher Richard, Mark R. Cutkosky. "Friction Identification for Haptic Display," Proc of the 1999 ASME IMECE Nashville, TN November 14-19, 1999.
- 6) 오재운, 김기호. "삼차원 공간에서 두 다면체 사이의 최소거리 계산을 위한 효율적인 알고리즘의 개발," 한국정밀공학회 논문집, 제15권, 제11호. pp. 130-136, Nov. 1998.
- 7) Gilbert. E. G., Johnson, D. W. and Keerthi, S S., "A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space," IEEE Journal of Robotics & Automation, Vol 6, No. 2, pp. 193-203, 1988